带膨胀腔喷嘴制冷剂 R134a 闪蒸喷雾可视化研究

周致富[1]，白飞龙[1]，王锐[1]，钞睿[1]，陈斌[1]，王国祥[1,2]
（[1]西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安，710049）
（[2]美国 Akron 大学机械工程系，Akron，美国）
(Tel: 029-82667326, Email: chenbin@mail.xjtu.edu.cn)

摘要闪蒸喷雾由于存在特殊的气泡爆裂使得其在较小压力下即能够实现较好的雾化效果。为了探索制冷剂 R134a 的闪蒸喷雾机理，本文利用高速摄像机对直管石英玻璃喷嘴内部流型以及不同膨胀腔喷嘴的外部喷雾特性进行了可视化观察及量化比较。发现随喷雾压力增大，制冷剂 R134a 在直管喷嘴内部表现出对称空化、非对称空化和类弹状空化等不同的空化流型，其中对称空化流型对应的雾化锥角基本相同。膨胀腔型喷嘴达到较小喷雾锥角所对应的膨胀腔长径比为 1:2~2:1，最佳外部喷雾锥角稳定在 70° 左右。

关键词闪蒸喷雾；膨胀腔喷嘴；内部流型；喷雾锥角

中图分类号：TK121 **文献标识码：**A

Visualization of the Flashing Spray Generating by the Expansion-chamber Nozzle using R134a

Zhou Zhi-Fu[1], Bai Fei-Long[1], Wang Rui[1], Chao Rui[1], Chen Bin[1], Wang Guo-Xiang[1,2]
[1] State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
[2]Department of Mechanical Engineering, University of Akron, USA

Abstract: Flashing spray could generate the desired fine atomization due to the bubble explosion at the nozzle exit at the low injection pressure. This paper presents an experimental study on both the internal flow and the spray pattern outside the nozzle tip so as to further understand the mechanism of the flashing spray. One straight tube nozzle made of the transparent quart glass and five expansion-chamber nozzles with different aspect ratio are employed. The result finds that the internal flow within the straight tube nozzle presents the symmetric cavitation flow, asymmetric cavitation flow and finally the slug cavitation flow with increasing the injection pressure. The spray angle almost remains constant for the slug cavitation flow. For the expansion-chamber nozzles, the spray angle maintains at the relatively smaller values as the aspect ratio of the length to the diameter of the expansion chamber ranges from 1:2 to 2:1, andthe optimal spray angle keeps fluctuating around 70°.

Key Words: Flashing spray, Expansion-chamber nozzle; Internal flow pattern; Spray angle

0 引言

高压液体或者液化气体由喷嘴喷出，压力突降至低于其初始温度对应的饱和压力时，过冷液体转变为极不稳定的过热液体，在极小扰动下过热液体将发生剧烈的爆裂现象，使液体破碎为细小液滴，这样的破碎雾化过程称为闪蒸喷雾，在工业生产和日常生活中有多种实例。例如，高压液体或液化气体在储存或输运过程中由于容器或管道泄漏引起的剧烈闪蒸喷雾现象，泄露介质以细小液滴形式在空气中快速均匀弥散，往往会引起灾难性事故[1]。汽油直喷内燃机中的燃油闪蒸喷雾，以及激光皮肤医学中的制冷剂瞬态闪蒸喷雾可以冷却保护正常皮肤组织、改善治疗效果[2, 3]。

实际过程中，高压液体在喷出之前，流经喷嘴内部伴随压力损失，使得部分液体过热发生沸腾相变形成气液两相流。而在喷嘴出口处经历压力突降，液体部分过热，并且气相部分快速膨胀破裂，从而形成良好的雾化效果。因此闪蒸喷雾包含两个重要过程：1）在喷嘴内部相变沸腾，实现内部两相流动；2）在喷嘴出口气泡爆裂产生液体雾化。

闪蒸喷雾特性很大程度上取决于喷嘴内部的气相两相流型[5,6]，已有学者开展了喷嘴内部过热液体初始空化流型的可视化研究。Sou&Hosokawa 等人[7]利用水为工质，发现在不同 Re 数下直管喷嘴入口附近显示了三种不同的流型：波动喷射（Re≤64000）、超空化喷射（Re~70000）和完全不对称喷射（Re~76000）。Suh 等人[8]以柴油为工质对于柴油发动机喷射实况进行实验研究，结果显示在透明直管喷嘴出口附近出现了类似现象，但是各种流

基金项目：本文受到国家自然科学基金重点项目（51336006）、陕西省国际科技合作重点项目（2013KW30-05）和中央高校基本科研业务费专项基金项目联合资助。

型对应的雷诺数较低。很多学者也对于喷嘴结构进行了改进：Bar-Kohany 等人[9]基于 Sher 等人[10]的面体中心理论对于形成最佳喷雾的喷嘴结构进行了分析，发现在喷嘴内部形成气液两相流可以改善喷雾效果，因而他们提出带有膨胀腔的喷嘴结构，并使用柴油开展了试验。结果表明，达到同样的雾化效果时，该喷嘴所需喷雾压力低于直管喷嘴。

虽然对于柴油机喷嘴的闪蒸喷雾特性已有一定的研究，但是目前对闪蒸雾化机理的认识还不够充分，尤其是对其内部流动对雾化特性的影响还缺乏深入的了解。本文利用高挥发性低温介质 R134a，研究观察直管喷嘴内部的空化流型及其与外部喷雾的关系，并研究了不同长径比膨胀腔喷嘴的喷雾特性。

1 实验系统及测试方法

如图 1 所示，本文加工了五种不同膨胀腔长径比的石英喷嘴，同时加工了直管喷嘴以对比喷嘴内部流型与膨胀腔结构对于外部雾场特性的影响。为了达到准确比较的目的，喷嘴其余尺寸固定，只以膨胀腔长径比为变量进行讨论（其中直管喷嘴无膨胀腔），喷嘴尺寸列于表 1。

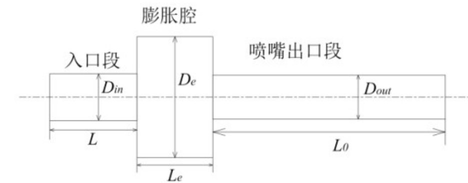


图 1 膨胀腔喷嘴结构示意图

Fig.1 Schematic of the expansion-chamber nozzle

实验系统如图 2 所示，制冷剂 R134a 储存在可控温控压的储液罐内，经由高压软管连接手动阀门与快速反应电磁阀（B2021SBTTO24DVC by Gems, USA，其全开与全关闭时间小于 5ms，可以准确控制几十毫秒的瞬态喷雾），喷嘴出口安装在电磁阀上。利用高速摄像仪（Phantom V611 by York, USA）对喷嘴内部流动及外部喷雾形态进行可视化拍摄研究，拍摄采用拍摄频率 10000fps，曝光时间 25μs。高速摄像时采用大功率 LED 连续光源，采用小角度仰视法补光。

表 1 喷嘴尺寸

Table 1 Nozzle sizes

D_{out}=1mmD_{in}=1mm　L=20mm　L_0=60mm						
喷嘴编号	1	2	3	4	5	6
l_e/D_e	-	1:4	1:2	1:1	2:1	4:1

图 2 实验系统图

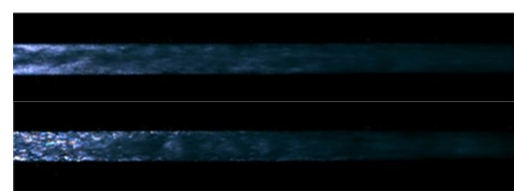
Fig. 2 Schematic of the experiment system

2 实验结果及讨论

经过电磁阀以及液体管道截面积与喷嘴截面积的突缩所产生的压力损失，会使过热态制冷剂 R134a 在喷嘴入口处形成部分空化现象，随着喷雾压力的改变空化类型也有所差别。直管喷嘴内部 R134a 空化流型列于图 3，当喷雾压力较小时，只在喷嘴入口附近出现了少量对称性空化，结果与 Sou[7]和 Suh[8]等人拍摄到的小雷诺数流型类似。随着喷雾压力的增加，空化形式仍然为对称空化，但是空化区域范围明显变大。当喷雾压力达到 1.3MPa 时，管壁的空化已经出现不对称，流型有向完全不对称流动转变的趋势。由于 R134a 在大气压力下的饱和温度很低，完全不对称流型并没有出现。发生边缘气化后，气体随着流动向中心扩散。扩散至中心的气体充当了较大的气化核心，使得中心液体进一步气化，在压力梯度作用下大气泡又被破碎为小气泡。经过高速湍动作用，细小气泡与喷嘴内部未气化液体

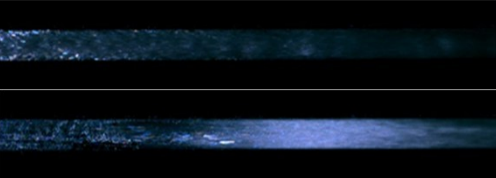
均匀混合形成类弹状流。随着喷雾压力进一步增加，两相混合弹发生位置变得比较靠前，气化范围也进一步增加。

为揭示直管喷嘴内部流型对于喷雾外部特性的影响，将喷雾压力从 0.8MPa 增加至 1.6MPa，得到了不同喷雾压力作用下直管喷嘴的外部喷射状况，如图 4 所示。由图可以看出，随着压力增加（从饱和压力附近开始），开始阶段雾化锥角剧烈增加，当压力达到 1.1MPa 时喷雾形状对于压力增加变得不太敏感，喷雾处于较稳定喷射区。结合图 3，此时喷管内部液体恰好处于对称气化流型区域。



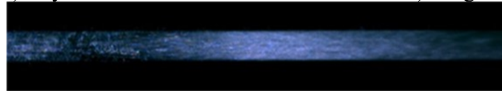
a)入口微对称流型（P=1.1MPa）b) 对称流型（P=1.2MPa）

a) Symmetric cavitation flow at the inletb) Symmetric cavitation flow



c) 不对称临界流型（P=1.3Mpa）d) 局部类弹状流动（P=1.4MPa）

c) Asymmetric and critical cavitation flowd) Slug cavitation flow in part region

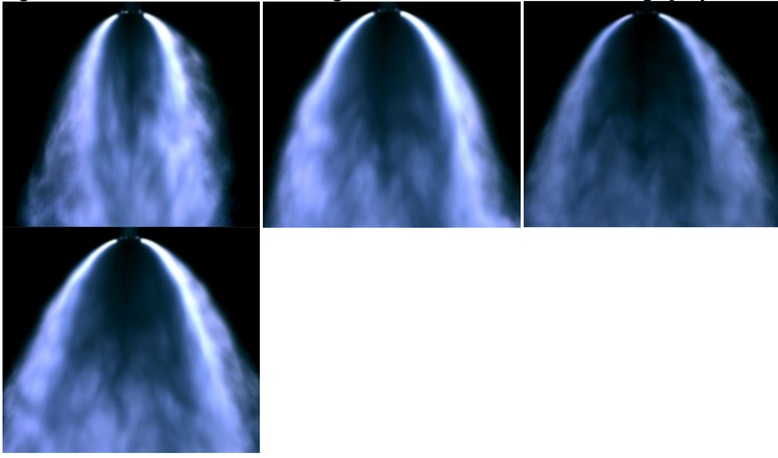


(e) 剧烈类弹状流动（P=1.5MPa）

(e) Turbulent slug cavitation flow

图 3 不同压力下直管喷嘴内部 R134a 流型

Fig. 3 Internal flow within the straight tube nozzle of R134a flashing spray



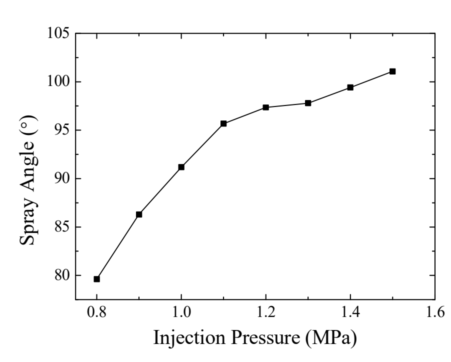
a)P=0.8MPa b)P=1.1MPa c) P=1.3MPa d)P=1.5MPa

图 4 不同喷雾压力作用下直管喷嘴喷雾形态

Fig.4 Spray patterns of flashing spray with the straight tube nozzle at different injection pressures

为了更清晰地分析喷雾外部特性及外部液滴经过一段距离后的扩散程度，引入 Laura Juslin 等人[11]的雾化锥角定义，即喷嘴出口一定距离下（15mm）两个喷雾边缘点与喷嘴出口连线所夹的角α。不同压力下直管喷嘴喷雾的锥角示于图 5，可知当喷雾压力在 1.1MPa 以下时其雾化锥角随压力变化剧烈，但当压力高于 1.1MPa 时，雾化锥角变化相对缓慢，这与 F. Payri 等人[12]的 Diesel 喷雾实验结果类似。

为了进一步探索喷嘴结构对于喷雾特性的影响，对带膨胀腔喷嘴的外部喷雾特性进行了比较。图 6 展现了不同喷雾压力下膨胀腔结构对于喷雾雾化锥角的影响，图 7 显示了不同喷射压力时膨胀腔喷嘴喷雾形态特性。



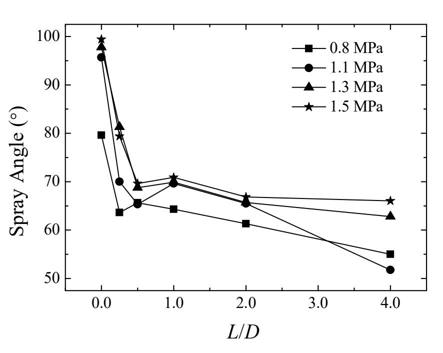
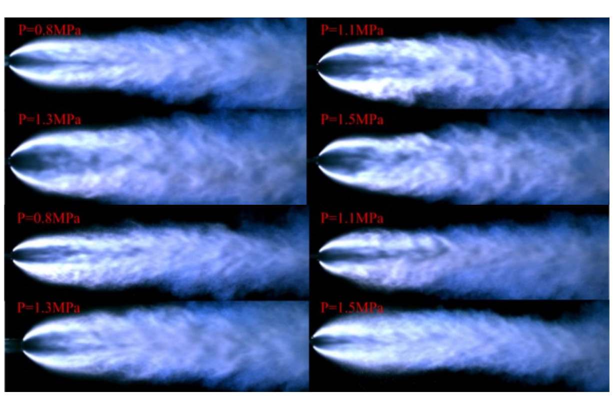


图 5 喷雾压力对于雾化锥角影响图 6 不同压力不同结构喷嘴喷雾锥角曲线 Fig.5 Variation of spray angle with injection pressure Fig.6 Variation of spray angle with aspect ratio at different injection pressure

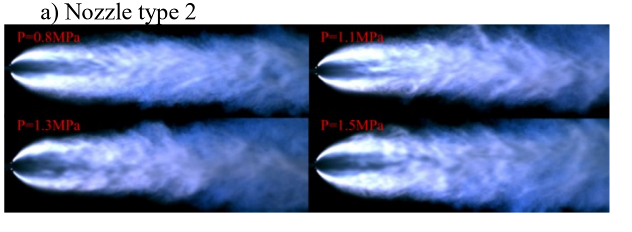
从图 6 和图 7 可以看出，不同压力下 1 号、2 号和 6 号三种喷嘴的雾化锥角变化剧烈，对于 6 号喷嘴由于膨胀腔长径比过大起到了反作用使得气化液体过多，表现出与直管喷嘴类似的振荡特性。而 3 号、4 号和 5 号喷嘴只在 R134a 饱和压力附近雾化锥角很小，当处于偏离饱和压力的高压喷雾区时，压力增加并不显著影响雾化锥角。将带有膨胀腔喷嘴与直管喷嘴进行比较可以发现，由于膨胀腔可以使过冷液体在喷嘴内部有效气化，在二次进入小喷嘴段时会形成充分的气液两相流动，使得过热度得到提前释放，可以显著减小雾化锥角，因而喷嘴结构（主要为膨胀腔长径比）是影响喷雾特性的最主要因素。对于不同的喷雾压力，喷嘴膨胀腔的长径比存在一个最佳比例区间 1:2~2:1。当喷雾压力远离饱和压力喷射时，在这一区间内喷雾压力对喷雾锥角影响较小，且基本不受喷嘴结构影响，最佳外部喷雾锥角稳定在 70° 左右。这一结论对于需要精确控制的喷雾有较强的实用价值。

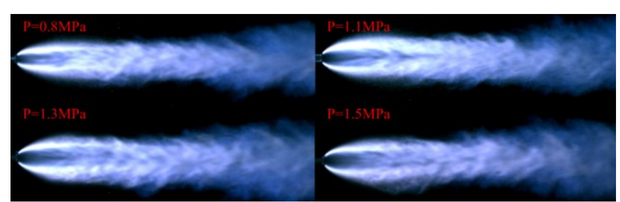
结合图 4 与图 7，还可以观察到不同喷嘴 R134a 闪蒸喷雾在喷嘴出口附近中心部分都存在一个液体破碎不充分区域（亮度较暗的区域，存在大的液块，过热度尚未充分释放）。直管喷嘴破碎不充分区域面积明显大于膨胀腔喷嘴，并且随喷雾压力增加而增大，随膨胀腔长径比增加而减小，进一步说明膨胀腔喷嘴内部相变产生的气液两相流有利于闪蒸喷雾过热度的提前释放，减小喷嘴出口雾场中破碎不充分区域，改善雾化效果。



a) 2 号喷嘴 b) 3 号喷嘴

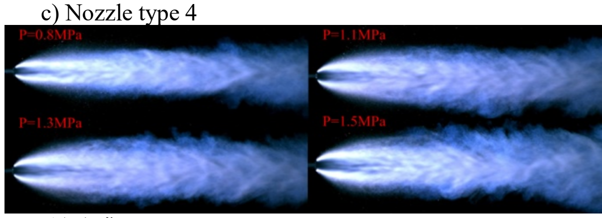
a) Nozzle type 2 b) Nozzle type 3





c) 4 号喷嘴 d) 5 号喷嘴

c) Nozzle type 4 d) Nozzle type 5



e) 6 号喷嘴

e) Nozzle type 6

图 7 不同压力下喷嘴结构对喷雾外部形态的影响

Fig. 7 Effect of nozzle type on the spray pattern of flashing spray

3 结论

本文通过高速摄像研究了制冷剂 R134a 闪蒸喷雾直管喷嘴内部流型，通过分析带膨胀腔结构的不同喷嘴闪蒸喷雾外部雾化形态，得到了以下结论：

1）制冷剂在直管喷嘴内部空化时，随压力增加会出现对称空化流动、非对称空化和类弹状空化等三种类型，其中非对称空化为临界空化形式。

2）不同流型对应的喷雾锥角相差较大，但是同一流型所对应的雾化锥角基本相同。

3）从外部雾化锥角特性分析可知，膨胀腔喷嘴结构对应的最佳膨胀腔长径比区间为 1:2~2:1，且带膨胀腔喷嘴雾化锥角均小于直管喷嘴，最佳外部喷雾锥角稳定在 70° 左右。在最佳膨胀腔长径比范围内，当喷雾操作压力远离饱和压力时，喷雾锥角随压力和膨胀腔长径比的变化较小。

参考文献

[1] Sher E, Bar-Kohany T, Rashkovan A. Flash-boiling atomization[J]. Progress in energy and combustion science, 2008, 34(4): 417-439

[2] Zhou Z F, Wu W T, Chen B, et al. An Experimental Study on the Spray and Thermal Characteristics of R134a Two-Phase Flashing Spray[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(15-16): 4460-4468

[3] Zhou Z F, Chen B, Wang Y S, et al. An Experimental Study on Pulsed Spray Cooling with Refrigerant R-404a in Laser Surgery[J].Applied Thermal Engineering, 2012, 39: 29-36

[4] Zeigerson-Katz M, Sher E. Spray Formation by Flashing of a Binary Mixture: a Parametric Study[J]. Atomization Sprays, 1998,8(3):255–66

[5] He L, Ruiz F. Effect of Cavitation on Flow and Turbulence in Plain Orifices for High-speed Atomization[J].Atomization and Sprays, 1995, 5(6):569–84

[6] Soteriou C, Andrews R, Smith M. Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization[R]. SAE technical paper, 1995, 2:950080

[7] Sou A, Hosokawa S, Tomiyama A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(17): 3575-3582

[8] Suh, H K and C S Lee. Effect of Cavitation in Nozzle Orifice on the Diesel Fuel Atomization Characteristics[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1001-1009

[9] Bar-Kohany T, Sher E. Subsonic Effervescent Atomization a Theoretical Approach[J]. Atomization Sprays 2004(6), 14:495–509

[10] Sher E, Elata C. Spray formation from pressure cans by flashing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1977, 16(2): 237-242

[11] Laura Juslin, Osmo Antikainen, Pasi Merkku,et al. Droplet Size Measurement: I. Effect of Three Independent Variables on Droplet Size Distribution and Spray Angle From a Pneumatic Nozzle[J]. International Journal of Pharmaceutics, 1995(2), 123:247-256

[12] Payri F, Bermudez V, Payri R, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles[J]. Fuel, 2004, 83(4): 419-431

通讯联系人：
陈斌，教授，联系电话：13619299948，029-82667326，Email:
chenbin@mail.xjtu.edu.cn, 地址：陕西省西安市咸宁西路28号，西安交通大学，动力工程多相流国家重点实验室

第一作者：
周致富，讲师，联系电话：13689260307，Email：
zfzhou@mail.xjtu.edu.cn，地址：陕西省西安市咸宁西路28号，西安交通大学，动力工程多相流国家重点实验室